

(12) NACH DEM VERTRAG ÜBER DIE INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT AUF DEM GEBIET DES PATENTWESENS (PCT) VERÖFFENTLICHTE INTERNATIONALE ANMELDUNG

(19) Weltorganisation für geistiges Eigentum
Internationales Büro



(43) Internationales Veröffentlichungsdatum
15. April 2010 (15.04.2010)

(10) Internationale Veröffentlichungsnummer
WO 2010/040649 A2

(51) Internationale Patentklassifikation:
G08G 1/081 (2006.01)

83620 Westenham (DE). **WEICHENMEIER, Florian** [DE/DE]; Fürstenstr. 7, 80333 München (DE).

(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/EP2009/062485

(74) **Anwalt: GROSSE SCHUMACHER KNAUER VON HIRSCHHAUSEN**; Nymphenburger Str. 14, 80335 München (DE).

(22) Internationales Anmeldedatum:
28. September 2009 (28.09.2009)

(25) Einreichungssprache: Deutsch

(81) **Bestimmungsstaaten** (soweit nicht anders angegeben, für jede verfügbare nationale Schutzrechtsart): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KM, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PE, PG, PH, PL, PT, RO, RS, RU, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.

(26) Veröffentlichungssprache: Deutsch

(30) Angaben zur Priorität:
10 2008 050 822.5
8. Oktober 2008 (08.10.2008) DE

(71) **Anmelder** (für alle Bestimmungsstaaten mit Ausnahme von US): **GEVAS SOFTWARE SYSTEMENTWICKLUNG UND VERKEHRSINFORMATIK GMBH** [DE/DE]; Nymphenburger Strasse 14, 80335 München (DE).

(84) **Bestimmungsstaaten** (soweit nicht anders angegeben, für jede verfügbare regionale Schutzrechtsart): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LS, MW, MZ, NA, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasisches (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), europäisches (AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT,

(72) **Erfinder; und**
(75) **Erfinder/Anmelder** (nur für US): **KEMPER, Carsten** [DE/DE]; St.-Wendel-Str. 31, 81379 München (DE). **BRAUN, Robert** [DE/DE]; Frey Str. 8, 80802 München (DE). **MAIER, Peter** [DE/DE]; Kampenwandstr. 11,

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]

(54) **Title:** TRAFFIC-ADAPTIVE NETWORK CONTROL AND METHOD FOR OPTIMIZING THE CONTROL PARAMETERS

(54) **Bezeichnung :** VERKEHRSADAPTIVE NETZSTEUERUNG UND VERFAHREN ZUR OPTIMIERUNG DER STEUERUNGSPARAMETER

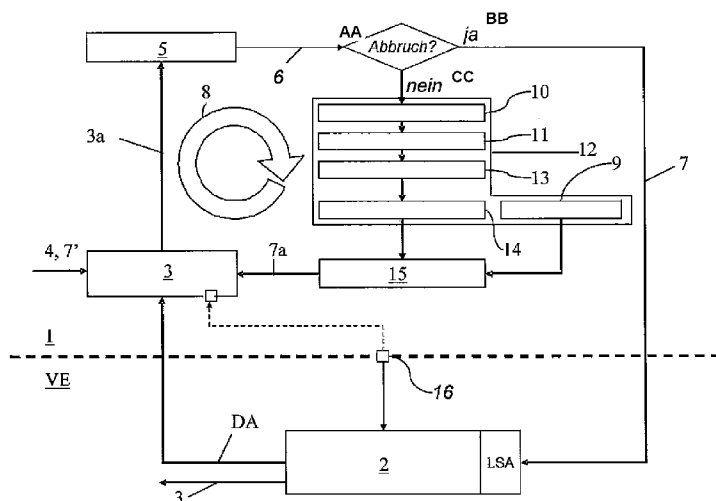


Fig. 3

(57) **Abstract:** The invention relates to a traffic control system for influencing a traffic flow in a limited road or traffic network comprising junctions, e.g. of a big city, light signal installations (LSA) corresponding to a number of junctions N and having individual controls, the signal plans currently determining the way in which said individual controls are controlled being forwarded to a traffic computer. Detectors are used in conjunction with the light signal installations (LSA) and acquire traffic data and forward them to the traffic computer. The traffic computer is adapted to operate, owing to the implementation of evolutionary algorithms or genetic algorithms including an associated termination criterion (termination) in such a manner that updated signal plans can be supplied to all N light signal installations (LSA) within a suitable time frame to optimize the traffic flow owing to the traffic flow of the road network determined by the detected traffic data. A repair mechanism is utilized when relative coding is used, or sequential coding is used to obtain the suitable time frame within which the phase transitions, which are part of a signal plan, may take place. The invention further relates to a method for operating the traffic control to influence the traffic flow and to a computer program product.

signal plan, may take place. The invention further relates to a method for operating the traffic control to influence the traffic flow and to a computer program product.

(57) **Zusammenfassung:**

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]

WO 2010/040649 A2



LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, SE, SI,
SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN,
GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

Veröffentlicht:

— *ohne internationalen Recherchenbericht und erneut zu veröffentlichen nach Erhalt des Berichts (Regel 48 Absatz 2 Buchstabe g)*

Die Erfindung betrifft eine Verkehrssteuerung zur Beeinflussung eines Verkehrsflusses innerhalb eines beschränkten Straßen- bzw. Verkehrsnetzes mit Kreuzungen, z. B. von einer Großstadt, mit einer der Kreuzungs-Anzahl N entsprechenden Anzahl von Lichtsignalanlagen LSA mit individuellen Steuerungen, deren den Steuerungsablauf aktuell bestimmende Signalpläne an einen Verkehrsrechner weitergeleitet werden. Detektoren sind im Zusammenhang mit den Lichtsignalanlagen LSA vorgesehen durch die Verkehrsdaten erfasst und an den Verkehrsrechner weitergeleitet werden können. Der Verkehrsrechner kann durch Implementierung von evolutionären Algorithmen bzw. genetischen Algorithmen mit einem zugeordneten Abbruchkriterium (Abbruch) so operieren, dass an alle N Lichtsignalanlagen LSA aufgrund des über die erfassten Verkehrsdaten ermittelten Verkehrsflusses des Straßennetzes aktualisierte Signalpläne innerhalb eines geeigneten Zeitrahmens zur Optimierung des Verkehrsflusses zugeführt werden können, wobei zur Erreichung des geeigneten Zeitrahmens, innerhalb dessen die Phasenübergänge, die Bestandteil eines Signalplanes sind, stattfinden dürfen, ein Reparaturmechanismus bei relativer Kodierung oder eine sequentielle Kodierung zum Einsatz gelangen. Ferner werden ein Verfahren zum Betrieb der Verkehrssteuerung zur Beeinflussung des Verkehrsflusses und ein Computerprogrammprodukt angegeben.

Verkehrsadaptive Netzsteuerung und Verfahren zur Optimierung der Steuerungsparameter

Die Erfindung betrifft eine Verkehrssteuerung mit Online-Optimierung der Steuerungsparameter von Signalplänen von Lichtsignalanlagen, ein Verfahren zu deren Durchführung sowie ein Computerprogramm-Produkt.

Es ist z. B. aus der DE 10 2005 041 067 A1 bekannt, die Lichtsignalanlage an einer Kreuzung von zwei Straßen autonom ablaufen zu lassen, indem jeweils die Verkehrsströme auf der sich kreuzenden Straßen erfasst werden und die Steuerung der Lichtsignalanlage der Kreuzung entsprechend momentaner und langfristiger Beobachtung erfolgt, um den Verkehrsfluss zu optimieren. Es kann somit auch mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit eine so genannte grüne Welle erreicht werden. Die Verbindung zu anderen Lichtsignalanlagen eines innerstädtischen Straßennetzes, womit in höherem Maße ein optimierter Verkehrsfluss einhergehen könnte, erfolgt jedoch nicht.

In der DE 10 2005 035 213 A1 wird die Kommunikation zwischen benachbarten Verkehrssteuerungsanlagen beschrieben. Hierbei wird jedoch keine Erweiterbarkeit auf ein gesamtes Straßennetz einer Großstadt beschrieben. Ferner ist es erforderlich, dass die Fahrzeuge selbst auch noch mit Kommunikationsgeräten ausgerüstet sind.

Es hat auch nicht an Versuchen gefehlt, die Lichtsignalanlagen eines gesamten Straßennetzes einer Großstadt über einen Verkehrsrechner zu beeinflussen (vgl. z. B. DE 10 2005 044 888 B4). Bei einem größeren Straßennetz ist es jedoch bis jetzt erst gelungen, den Verkehrszustand als Schätz-Ergebnis auszuweisen. Für die einzelnen Lichtsignalsteuerungen wurde zum Teil ein autonomer Betrieb vorgesehen.

Es ist im Fachgebiet auch bekannt, dass verkehrsabhängige Lichtsignalsteuerungen in Ballungsgebieten seit geraumer Zeit im Einsatz sind. Ihre Wirkungen wurden bereits in verschiedenen Untersuchungen analysiert und mit denen von Festzeitsteuerungen verglichen. Die Ergebnisse zeigen, dass durch die Verkehrsabhängigkeit der Verkehrsfluss in Städten verbessert wird, insbesondere bei geringer bis mittlerer Auslastung der Knotenpunkte und bei wechselnder Verkehrsnachfrage. Weiterhin wurde herausgefunden, dass

gewöhnliche, verkehrsabhängige Steuerungsverfahren bei hohen Auslastungen zu Festzeitsteuerungen auflaufen und dadurch keinen Vorteil mehr gegenüber der kostengünstig zu realisierenden Festzeitsteuerung bieten.

Aus diesem Grund wurden in der Vergangenheit verschiedene modellbasierte Steuerungsverfahren entwickelt, die in der Lage sind, mit der begrenzten Information der Datenerfassung die Verkehrssituation nahezu richtig zu prognostizieren und die Wirkungen auf den Verkehrsfluss in Abhängigkeit der Lichtsignalsteuerung zu berechnen.

Die Aufgabe der Erfindung besteht darin, eine Verkehrssteuerung mit einem Verkehrsrechner bereitzustellen, bei der Signalpläne von Steuerungen aller Lichtsignalanlagen eines Verkehrsnetzes aktualisiert werden können, um einen optimalen Verkehrsfluss innerhalb des Verkehrsnetzes zu erreichen. Des Weiteren ist es Aufgabe der Erfindung ein Verfahren zum Betrieb der erfindungsgemäßen Verkehrssteuerung sowie ein Computerprogrammprodukt anzugeben.

Die Aufgabe wird bei einer Verkehrssteuerung nach Anspruch 1 gelöst, indem zur Beeinflussung eines Verkehrsflusses innerhalb eines beschränkten Straßen- bzw. Verkehrsnetzes mit Kreuzungen, z. B. von einer Großstadt, mit einer der Kreuzungs- Anzahl N entsprechenden Anzahl von Lichtsignalanlagen LSA mit individuellen Steuerungen, vorgesehen ist, deren den Steuerungsablauf aktuell bestimmende Signalpläne an einen Verkehrsrechner weiter zu leiten, wobei Detektoren DE im Zusammenhang mit den Lichtsignalanlagen LSA vorgesehen sind, durch die Verkehrsdaten DA erfassbar und an den Verkehrsrechner weiterleitbar sind, wobei der Verkehrsrechner durch Implementierung von evolutionären Algorithmen (ev. Alg.) bzw. genetischen Algorithmen (gen. Alg.) mit einem zugeordneten Abbruchkriterium (Abbruch) so operieren kann, dass der Verkehrsrechner an alle N Lichtsignalanlagen LSA aufgrund des über die erfassten Verkehrsdaten DA ermittelten Verkehrsflusses des Straßennetzes aktualisierte Signalpläne innerhalb eines geeigneten Zeitrahmens an alle N Lichtsignalanlagen LSA zur Optimierung des Verkehrsflusses zuzuführen vermag, wobei zur Erreichung des geeigneten Zeitrahmens, innerhalb dessen die Phasenübergänge, die Bestandteil eines Signalplanes sind, stattfinden dürfen, ein Reparaturmechanismus bei relativer Kodierung oder eine sequentielle Kodierung zum Einsatz gelangen.

Ferner wird die Aufgabe bei einem Verfahren zum Betrieb der Verkehrssteuerung nach Anspruch 5 gelöst, indem zum Betrieb einer Verkehrssteuerung folgende Schritte zur Optimierung vorgesehen sind:

- Bewerten des Verkehrsflusses mit einem Verkehrsmodell innerhalb des Rechners,

- Eingeben der Daten DA von Detektoren DE von Kreuzungen des Verkehrsnetzes,
- Anwendung evolutionärer bzw. genetischer Algorithmen,
- Eingeben der Signalpläne der Lichtsignalanlagen LSA,
- Bilden einer Wirkungsgröße mittels des Verkehrsmodells,
- Bewerten der Wirkungsgröße mit einer Zielfunktion zur Gewinnung einer Fitness,
- Ausgeben neuer Signalpläne bei Vorliegen eines geeigneten Fitnesswerts an die Lichtsignalanlagen LSA des Verkehrsnetzes,
- bei Nichtvorliegen eines geeigneten Fitnesswertes Durchlauf zur Optimierung von einer Verarbeitungsschleife mit Selektion, Rekombination, Mutation, Neuer Population, und Dekodierung,
- zusätzliche Zuführung einer Anfangpopulation,
- Bildung eines Individuums mit Genen als Steuerungsparameter im Optimierungsbereich entsprechend evolutionärer bzw. genetischer Algorithmen,
- Rückübersetzung mit der Dekodierung in einen Signalplan,
- Durchlaufen der Schleife Optimierung solange, bis durch ein Abbruchkriterium (Abbruch) ein neuer Signalplan an die Lichtsignalanlagen LSA ausgegeben werden kann,
- Vorsehen einer eingrenzbaeren Anzahl von Schleifendurchläufen zur Einhaltung eines geeigneten Zeitrahmens zur Ausgabe aller Signalpläne an alle Lichtsignalanlagen LSA, und
- Bereitstellen eines Reparaturmechanismus bei einer relativen Kodierung oder Bereitstellen einer sequentiellen Kodierung.

Das Computerprogrammprodukt nach Anspruch 10 berücksichtigt, das dieses direkt in einen Speicherbereich, mindestens einen Unterbereich des Verkehrsrechners oder eines separaten Rechners, ladbar ist, mit Programmcode- Mitteln, die dazu bestimmt sind, einzelne oder alle Schritte des vorstehen beschriebenen Verfahrens auszuführen, wenn das Computerprogrammprodukt auf dem entsprechenden Rechner der Verkehrssteuerung ausgeführt wird.

Mit der Erfindung ist es möglich, einen eindeutig verbesserten Verkehrsfluss in einem städtischen Verkehrsnetz zu erreichen. Die Stauungen im Verkehrsnetz sind beachtlich geringer, womit ein geringerer Kraftstoffverbrauch der Fahrzeuge der Verkehrsteilnehmer einhergeht und weniger schädliche Abgase die Umwelt belasten. Mit der Erfindung wird es ferner möglich, in einem Optimierungszeitintervall von fünf bis zehn Minuten die Signalpläne aller Lichtsignalanlagen des Verkehrsnetzes auszugeben.

Zweckmäßige und weiterhin vorteilhafte Weiterbildungen der Verkehrssteuerung und des Verfahrens zum Betrieb der Verkehrssteuerung sind in den abhängigen Ansprüchen angegeben.

Für die Verkehrssteuerung ist ferner vorgesehen, dass der Verkehrsrechner einen Bereich mit Unterbereichen aufweist, der die Evolutionären Algorithmen (ev. Alg.) bzw. genetischen Algorithmen (gen. Alg.), ein Abbruchkriterium (Abbruch) und bei relativer Kodierung den Reparaturmechanismus oder die sequentielle Kodierung verkörpert sowie dass der Bereich durch einen separaten Rechner gebildet werden kann, der in Datenaustausch mit dem Rechner steht.

Zur Weiterbildung des Verfahrens gehört insbesondere, dass Individuen aus der neuen Population in Signalpläne dekodiert werden, die dem weiteren Schleifendurchlauf unterliegen, wobei in Abhängigkeit von der Rechenleistung des Rechners eine erhebliche Anzahl von Individuen, die Signalpläne repräsentieren, erzeugt werden. Gute Ergebnisse wurden beispielsweise mit 100 Individuen erreicht.

Bei dem Reparaturmechanismus bei relativer Kodierung sind T-Zeiten für jedes Chromosom definiert, und es wird jede T-Zeit überprüft, ob sie sich innerhalb des Intervalls $[T_{iB}^{\min}; T_{iB}^{\max}]$ befindet und falls dies nicht der Fall ist, wird der gesamte Signalplan mit Hilfe des lokalen Versatzes θ so verschoben, so dass die ungültige T-Zeit der nächsten Grenze des Intervalls $[T_{iB}^{\min}; T_{iB}^{\max}]$ entspricht, wobei anschließend alle T-Zeiten erneut überprüft werden müssen.

Ferner ist hervorzuheben, dass bei der sequentiellen Kodierung T-Zeiten T_i sequentiell berechnet werden, wobei

die *erste* T-Zeit T_1 , die dem lokalen Versatz entspricht, sich dabei direkt aus dem Gen

θ_1 berechnet:

$$T_1 = (\tau_1^{\min} + \theta_1 \cdot (\tau_1^{\max} - \tau_1^{\min}))$$

und ferner für alle Zeiten T_i vorgesehen ist, dass sie sich jeweils im Intervall

$$T_i \in \left[\max(T_i^{\min}, T_{i-1} + Z_{i-1}), \min\left(T_i^{\max}, T_{i|i+1}^{\max}, T_{i|i+2}^{\max}, \dots, T_{i|n}^{\max}, T_1 + t_U - \sum_{l=i}^n Z_l\right) \right]$$

befinden und analog wie T_1 über das zugehörige Gen θ_1 berechnet werden.

Die Erfindung wird nachfolgend im Einzelnen und anhand von Ausführungsbeispielen weiter erläutert. Es zeigen:

- Fig. 1: eine vernetzte Steuerung von Lichtsignalanlagen in Prinzipdarstellung,
Fig. 2. ein Blockschaltbild mit Lichtsignalanlagen, Detektoren und Verkehrsrechner,
Fig. 3: ein Funktionsdiagramm zur Optimierung von Signalplänen mit Hilfe von Evolutionären Algorithmen,
Fig. 4: ein Phasendiagramm mit T-Zeitgrenzen für die lokale verkehrsabhängige Steuerung,
Fig. 5: ein Phasendiagramm für die relative Kodierung von Umlaufzeit und Freigabezeiten, und
Fig. 6: ein Phasendiagramm mit Darstellung der Einschränkung der Intervallgrenzen für T_i im Zusammenhang mit einer erfindungsgemäßen sequentiellen Kodierung.

Die Fig. 1 zeigt eine vernetzte Steuerung bzw. Verkehrssteuerung von Lichtsignalanlagen LSA in einer Prinzipdarstellung mit vier Kreuzungen eines insgesamt Straßennetzes, z. B. von einer Großstadt mit N Lichtsignalanlagen, entsprechend N Kreuzungen (n Knoten), deren Verkehrsfluss günstig zu beeinflussen ist. Verkehrsdaten DA werden dazu aus den Detektoren DE gewonnen und zentral von einem Verkehrsrechner 1 ausgewertet. Anschließend wird die erwartete netzweite Verkehrslage berechnet. Als Ergebnis werden die optimierten neuen Lichtsignalpläne bzw. Steuerungsparameter PA_n , die der Verkehrsrechner aus den zuvor vorliegenden Steuerungsparameters PA_v gewinnt an die einzelnen Lichtsignalanlagen LSA im Netz gesendet und so die aktuelle Verkehrssituation beeinflusst. Soweit in Fig. 1 der bidirektionale Datenfluss bezüglich der Steuerungsparameter DA nicht differenziert erkennbar ist, so geht dies eindeutig aus Fig. 2 hervor, die die Anbindung des Verkehrsrechners 1 an die einzelnen Steuerungen S von Lichtsignalanlagen eines Verkehrs- bzw. Straßennetzes, zugeordnet dem Verkehrsgeschehen VE bzw. der realen Welt, zeigt. Die Steuerungen S sind in der Lage, den der einzelnen Lichtsignalanlage LSA vom Verkehrsrechner 1 zugewiesenen, optimierten Signalplan, wozu nachstehend noch weitere Erläuterungen folgen, aufgrund der übertragenen neu aktualisierten Parameter PA_n umzusetzen, so dass die Lichtsignalanlage danach betrieben werden kann. Es ist eine Beeinflussung aller Lichtsignalanlagen N aller N Kreuzungen des Verkehrsnetzes vorgesehen. Im Übrigen wird noch ergänzt, dass der Verkehrsrechner 1 einen Bereich 1a aufweist, der die eigentliche Erfindung verkörpert, nämlich Unterbereiche des Bereichs 1a, die geeignete Speicherinhalte aufweisen, um die – auch nachfolgend beschriebenen – evolutionären/genetischen Algorithmen „ev. Alg./gen.Alg.“ als auch die Abbruchkriterien „Abbruch“-, im Besonderen bei der relativen Kodierung mittels eines Reparaturmechanismus oder alternativ unmittelbar gebildet durch geeignete Anwendung einer sequentiellen Kodierung, aufnehmen zu können. Es ist auch möglich, dass der Bereich 1a des Verkehrs-

rechners 1 durch einen separaten Rechner gebildet wird, der dann unmittelbar und direkt die beanspruchte Erfindung verkörpert. Ebenso wird die Erfindung durch ein Computerprogrammprodukt verkörpert, das direkt in einen Speicherbereich 1a, mindestens Unterbereich von 1a des Verkehrsrechners 1 oder eines separaten Rechners, ladbar ist, mit Programmcode-Mitteln, die dazu bestimmt sind, einzelne oder alle Schritte des vorstehend beschriebenen Verfahrens auszuführen, wenn das Computerprogrammprodukt auf dem entsprechenden Rechner der Verkehrssteuerung ausgeführt wird.

Zum Verständnis der Erfindung wird erläutert, dass modellbasierten Steuerungsverfahren, realisiert mit einem herkömmlichen Verkehrsrechner, äußerlich wie obig dargestelltem Verkehrsrechner 1 entsprechend, zum Teil auf die vorhandenen Lichtsignalsteuerungsverfahren (Festzeit- oder verkehrsabhängige Steuerungslogik, zugeordnet zu einer individuellen Steuerung einer Lichtsignalanlage) aufsetzen und die Parameter, der bei der Planung der Steuerung entstandenen Signalpläne mit Hilfe mehr oder weniger komplexer mathematischer Verfahren optimieren, ohne dass von einer konsequenten Online-Steuerung gesprochen werden könnte.

Die Kodierung der Steuerungsparameter für die individuellen Steuerungen der Lichtsignalanlagen des Verkehrsnetzes soll nun erläutert werden. Dazu wird wie folgt ausgeführt. Ein Signalplan lässt sich über folgende Steuerungsparameter beschreiben:

- Umlaufzeit
- Versatzzeit
- Phasenfolge
- Phasendauern (bzw. Startzeitpunkte der Phasenübergänge)

Ein Signalplan läuft innerhalb der Umlaufzeit einmal komplett ab. Die Versatzzeit beschreibt den zeitlichen Versatz des Referenzpunkts des lokalen Signalplans zur globalen (netzweit gültigen) Zeitskala. Die Phasenfolge gibt an, welche Phasen in welcher Reihenfolge geschaltet werden. Die Phasendauern bzw. die Startzeitpunkte der Phasenübergänge geben die Dauer einer Phase an.

Die netzweite Optimierung dieser Parameter für alle Lichtsignalanlagen stellt ein komplexes Problem mit einer sehr hohen Anzahl von Freiheitsgraden dar. Das Optimierungsproblem gehört zur Klasse der NP-vollständigen Probleme und ist analytisch nicht zu lösen, da keine geschlossene mathematische Formulierung möglich ist.

Es ist bekannt, bei in der Online-Optimierung von Steuerungsparametern, die bestimmend sind für die Signalpläne, insbesondere für die Steuerung von Lichtsignalanlagen, die Verwendung von mathematisch exakten Verfahren wie Analytische Optimierungsverfahren

und Optimierungsverfahren mit endlichem Rechenprozess sowie mathematischer Näherungsverfahren, wie der Hill-Climbing Algorithmus und das Gradientenverfahren heranzuziehen. Für die Offline-Optimierung werden seit einiger Zeit heuristische Verfahren angewendet, um die Steuerungsparameter zu optimieren. Zu den heute bekannten und verwendeten heuristischen Verfahren zählen z.B.

- Complex-Methode
- Simulierte Abkühlung
- Ameisenkolonieoptimierung
- Partikelschwarmoptimierung
- Evolutionäre Algorithmen
- Memetische Algorithmen

Der bei der Erfindung gewählte, letztlich erfolgreich ausgestaltete, Ansatz zählt zu den Evolutionären Algorithmen. Evolutionäre Algorithmen werden immer häufiger dort eingesetzt, wo große Lösungsräume effizient nach einem Optimum durchsucht werden müssen. Nachteil dieser Verfahren ist jedoch der enorm hohe Rechenaufwand, weshalb diese Verfahren bislang ausschließlich offline, zumeist in der Planung von Lichtsignalanlagen eingesetzt werden.

Im Vorfeld der Erfindung wurde herausgefunden, dass die Kodierung der Steuerungsparameter von entscheidender Bedeutung für die Qualität und Funktionsfähigkeit der Optimierung ist. Unter Kodierung ist bei einem evolutionären Algorithmus die Übersetzung der (in diesem Fall) Signalpläne (Phänotyp) in ein für den evolutionären Algorithmus verarbeitbares Individuum (Genotyp) zu verstehen. Die Rückübersetzung eines Individuums in die Signalpläne wird folglich als Dekodierung bezeichnet. Das Individuum besteht aus einzelnen Genen, die die Steuerungsparameter repräsentieren.

Die Gene werden nicht wie üblich binär, sondern reell kodiert. Reell kodierte Gene haben den Vorteil, dass sie direkt als numerischer Wert interpretiert werden können und außerdem über die höchste Zahl an Freiheitsgraden bezüglich Rekombination und Mutation verfügen. Durch die reelle Kodierung, also durch die Nutzung reeller Zahlen (Fließkommazahlen) können die verwendeten Algorithmen schneller stabile Lösungen erreichen.

Bevor die Optimierung beginnt, wird der aktuelle Signalplan bewertet. Dazu wird (vgl. Fig. 3) der Verkehrsfluss 2 über die Detektoren DA gemessen und an das Verkehrsmodell 3, also einem mathematischen Modell zur Abbildung von Verkehrsströmen im Rechner 1, übergeben. Über die Netzversorgung 4 bzw. über das Verkehrsnetz stehen dem Verkehrsmodell 3 die aktuellen Signalpläne 7' aller zu optimierenden Lichtsignalanlagen zur Verfügung, wodurch die Wirkung der Signalpläne auf den Verkehrsfluss 2 bestimmt wird.

Bewertet wird der Verkehrsfluss 2 durch eine mathematische Beschreibung des Ziels, der Zielfunktion 5. Ziel der Optimierung kann z.B. sein, die Wartezeiten, die Zahl der Halte, die Rückstaulängen und/oder den Kraftstoffverbrauch im gesamten Verkehrsnetz zu minimieren. Das Ergebnis der Bewertung ist ein skalarer Wert im Folgenden mit Fitness 6 bezeichnet. Diese erstmalige Bewertung der Signalpläne 7a wird als Referenz für die im Folgenden ablaufende Optimierung verwendet, d.h. durch die Optimierung wird versucht, gemäß der Zielfunktion, z.B. die Wartezeiten, die Zahl der Halte, die Rückstaulängen und/oder den Kraftstoffverbrauch im gesamten Verkehrsnetz zu minimieren und dadurch im Vergleich zum Referenzwert einen geringeren skalaren Wert zu erreichen.

Zum weiteren Verständnis ist wieder die schon erwähnte Fig. 3 heranzuziehen, die ein Funktionsdiagramm zur Optimierung der Signalpläne mit Hilfe von evolutionären Algorithmen zeigt.

Zu Beginn der Optimierung 8 wird eine Anfangspopulation 9 erzeugt, also eine bestimmte Anzahl von Individuen, die jeweils die Signalpläne aller Lichtsignalanlagen in kodierter Form repräsentieren. Diese Individuen der Anfangspopulation 9 werden entweder zufällig generiert oder aus einer Datei/Datenbank gelesen, sofern bereits gute Individuen, die gute Signalpläne repräsentieren, bekannt sind. Die Individuen werden in Signalpläne 7a dekodiert und mit Hilfe des Verkehrsmodells 3 hinsichtlich der Zielfunktion 5 bewertet. Die Fitnesswerte 6 der Signalpläne werden ihren entsprechenden Repräsentanten (kodierte Individuen) in der Population zugeordnet. Mit Hilfe der Fitness 6 findet dann eine Auswahl von Eltern statt, die so genannte Selektion 10. Durch die Rekombination 11 der ausgesuchten Eltern werden Nachkommen, also neue Individuen (Individuum 11) erzeugt. Die Gene dieser Nachkommen werden nun zufällig mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit mutiert (vgl. Mutation 13). Zusammen mit dem oder den besten Individuen der Elterngeneration wird so eine neue Population 14 gebildet, deren Individuen wiederum in Signalpläne 7a mit der Dekodierung 15 dekodiert und mit Hilfe des Verkehrsmodells 3 bewertet werden. Diese Optimierung 8 der Signalpläne läuft solange ab, bis ein gesetztes Abbruchkriterium (Abbruch) erfüllt ist. Abbruchkriterien sind z.B. maximale Anzahl Generationen, keine Veränderung der Fitness über n Generationen, erreichter Fitnesswert oder die Zeitdauer der Optimierung. Ist dieses erfüllt, so werden die dekodierten Signalpläne 7 an die Lichtsignalanlagen LSA geschickt. Es wurde auch erkannt und wird berücksichtigt, dass zwischen Verkehrsfluss 2 und dem Verkehrsmodell 3 eine Wechselbeziehung „wechselnde Nachfrage / Umwelteinflüsse“ besteht, die mit 16 bezeichnet ist. Dies bedeutet, dass das Verkehrsmodell 3 auf externe Einflüsse reagiert.

Die konsequente Nutzung evolutionärer/genetischer Algorithmen in der Online-Optimierung der Lichtsignalsteuerung ist wesentlicher Bestandteil vorliegender Erfindung.

Die einzuhaltenden Randbedingungen bei der Optimierung der Steuerungsparameter stellen die größte Schwierigkeit bei der Kodierung und Dekodierung dar. Dabei wird unterschieden zwischen harten Randbedingungen, also denen die zwingend erfüllt sein müssen, und weichen Randbedingungen, also deren Erfüllung wünschenswert ist. Lösungen, die eine harte Randbedingung nicht einhalten, werden als ungünstig bezeichnet.

Unter zwingenden Randbedingungen sind bei der Signalplanoptimierung die Zwischenzeiten und Mindestfreigabedauern zu verstehen. Diese zeitlichen Anteile des Signalplans stehen somit nicht für die Optimierung zur Verfügung. Ferner müssen zusätzlich die bereits vorhandenen lokalen (d.h. an einem einzelnen Knotenpunkt) verkehrsabhängigen Steuerungen und ÖPNV-Priorisierungen, d.h. Priorisierungen des öffentlichen Nahverkehrs, berücksichtigt werden. Es wurden zurückliegend bei einer messwertbasierten Zeitlückensteuerung schon Versuche unternommen, für den Abbruch einer Phase einen Rahmen vorgegeben, innerhalb dessen der Abbruch erfolgen kann. Der Abbruch einer Phase ist gleichbedeutend mit dem Start eines Phasenübergangs, vgl. Fig. 4, die ein Phasendiagramm mit T-Zeitwertgrenzen für die lokale, verkehrsabhängige Steuerung, mit beispielsweise Kreuzungen K1 bis K4 zeigt. Diese Fig. 4 dient auch zum Verständnis folgender, weiterer Ausführungen. Es soll hier auch eingeschoben werden, dass die Darstellung von Phasendiagrammen Richtlinien des Fachgebietes unterliegt, z. B. Richtlinien für Lichtsignalanlagen, FGSV- Verlag Köln, Berichtiger Nachdruck 1998 und Teilfortschreibung 2003. In der Darstellung in der Fig. 4 ist vorgesehen, dass die durchgezogene Linie einer roten Linie, dass der gepunktete Bereich einer grünen Fläche und der schraffierte Bereich einer roten Schraffur auf grünem Hintergrund entsprechen soll. Zum Wesen der Erfindung gehört, dass die Optimierungsaufgabe darin besteht, die spätesten Starts der Phasenübergänge T_{iB} für alle LSA im betrachteten Netz so zu bestimmen, dass der Zielfunktionswert, d.h. das für das Optimierungsziel angestrebte Skalar, minimal wird. Um die Funktionalität der lokalen verkehrsabhängigen Steuerung sicherzustellen, ist für T_{iB} ein Intervall $[T_{iB}^{min}; T_{iB}^{max}]$ vorgegeben, innerhalb dessen Grenzen sich T_{iB} befinden muss.

Bei einem Verfahren, das zum Vorfeld der Erfindung gehört, werden zwei Parameter der Lichtsignalsteuerung optimiert: die Versatzzeit und die Phasenfolge. Bei der Verwendung genetischer / evolutionärer Algorithmen in der Praxis werden Verletzungen der harten Randbedingungen häufig mit hohen Strafwerten (Penalty) beaufschlagt, damit das Individuum vom genetischen Algorithmus als schlecht bewertet und mit großer Wahrscheinlichkeit nicht weitergeführt und ausselektiert wird, was allerdings nicht garantiert werden kann. Auch in dem bereits bekannten Verfahren der Online-Optimierung der Lichtsignalsteuerung in dem zwei Parameter optimiert werden, wurde für jede zu optimierende

Versatzzeit eine Straffunktion eingeführt, um Verletzungen der Randbedingungen zu bestrafen.

Hinsichtlich der Kodierung der Steuerungsparameter wird noch auf die weiteren Ausführungen, die zum Verständnis der Erfindung erforderlich sind, hingewiesen.

Die bereits beschriebenen Steuerungsparameter Umlaufzeit, Versatzzeit, Phasenfolge und Phasendauern (bzw. Startzeitpunkte der Phasenübergänge) werden für genetische Algorithmen in ein Individuum beliebiger Länge kodiert:

$$\left\{ \phi, (\sigma_1, \omega_1, \theta_{11}, \dots, \theta_{1m_1}), (\sigma_2, \omega_2, \theta_{21}, \dots, \theta_{2m_2}), \dots, (\sigma_n, \omega_n, \theta_{n1}, \dots, \theta_{nm_n}) \right\}$$

Das Individuum enthält ein Gen ϕ für die gemeinsame Umlaufzeit sowie n sogenannte Chromosomen für n Knotenpunkte des zu optimierenden Netzes. Jedes Chromosom besteht aus einem Gen σ zur Festlegung der Phasenfolge, einem Gen ω für den globalen Versatz, sowie m Genen θ für die maximale Anzahl von möglichen Phasenübergängen. Jedes Gen nimmt einen reellen Wert zwischen 0,0 und 1,0 an.

Die Umlaufzeit t_U wird üblicherweise und wie auch bekannt, errechnet zu

$$t_U = t_{U,\min} + \phi \cdot (t_{U,\max} - t_{U,\min}) \quad (1)$$

Kann die Umlaufzeit innerhalb des zu optimierenden Netzes frei gewählt werden, so kann t_U direkt übernommen werden. Andernfalls wird das berechnete t_U kaufmännisch auf die nächst mögliche Umlaufzeit gerundet.

Die Phasenfolge wird über eine Umrechnung des Gens in eine Kennziffer ausgewählt, die einer der möglichen Phasenfolgen zugeordnet ist.

$$i = \sigma \cdot s \quad (2)$$

mit s = Anzahl der verfügbaren Phasenfolgen

Die globale Versatzzeit wird generell wie folgt berechnet:

$$t_V = \omega \cdot t_U \quad (3)$$

Für die Kodierung der Phasendauern bzw. der Startzeitpunkte der Phasenübergänge, im Folgenden als T-Zeiten benannt, gibt es verschiedene Ansätze im Fachgebiet. Allen gemein ist jedoch die Nichteinhaltung der harten Randbedingungen hinsichtlich der lokalen verkehrsabhängigen Steuerung, wodurch die Lösung der technischen Aufgabe unter Einhaltung einer maximalen Rechenzeit nicht zufrieden stellend gelöst werden kann.

Beispiel einer solchen relativen Kodierung:

Die relative Kodierung lässt die Randbedingungen der lokalen verkehrsabhängigen Steuerung zunächst unberücksichtigt. Danach berechnen sich die Phasendauern zu

$$P_i = \frac{\theta_i}{\sum_{l=1}^{k_\sigma} \theta_l} \cdot \left(t_U - \sum_{l=1}^{k_\sigma} Z_{\sigma,l} \right)$$

Z ist der minimale Abstand zwischen zwei benachbarten T-Zeiten, der sich aus der maßgebenden Summe von Zwischenzeit und Mindestfreigabezeit ergibt. Die Mindestphasendauern sind damit in dieser Formel bereits in Z enthalten, d.h. P_i ist nur der optimierbare Anteil der Phase.

Eine diesbezügliche Darstellung ist in Figur 5 erfolgt, in der ein Phasendiagramm mit Darstellung der relativen Kodierung von Umlaufzeiten und Freigabezeiten aufgenommen ist.

Für die Position des Signalplans bezüglich der lokalen Zeitskala – auf die sich auch T_{iB}^{\min} und T_{iB}^{\max} beziehen (Randbedingungen aus der lokalen verkehrsabhängigen Steuerung) – ist ein zusätzliches Gen 0 für den lokalen Versatz erforderlich. Das Individuum wird daher um dieses Gen erweitert:

$$\left\{ \phi, (\sigma_1, \omega_1, o_1, \theta_{11}, \dots, \theta_{1m_1}), (\sigma_2, \omega_2, o_2, \theta_{21}, \dots, \theta_{2m_2}), \dots, (\sigma_n, \omega_n, o_n, \theta_{n1}, \dots, \theta_{nm_n}) \right\}$$

Die T-Zeit-Grenzen errechnen sich dann zu:

$$T_{1B} = \left(T_{1B}^{\min} + o \cdot (T_{1B}^{\max} - T_{1B}^{\min}) \right)$$

Alle weiteren T-Zeiten T_{iB} berechnen sich dann in Abhängigkeit von T_{iB} und Z .

$$T_{iB} = \left(T_{1B} + \sum_{l=1}^{i-1} P_l + \sum_{l=1}^{i-1} Z_{\sigma,l} \right)$$

Durch die relative Kodierung sind die zwingenden Randbedingungen immer eingehalten. Allerdings ist damit noch nicht sichergestellt, dass auch die Randbedingungen der lokalen verkehrsabhängigen Steuerung eingehalten werden. Die übliche Vorgehensweise ist daher bei Nichteinhaltung die Nutzung der bereits genannten Straffunktion.

Eine praktische Lösung unter Einhaltung problemspezifischer Randbedingungen zur Kodierung der Steuerungsparameter zur Optimierung der Lichtsignalsteuerung stellt ein Reparaturmechanismus für die relative Kodierung dar.

Sämtliche T-Zeiten werden für jedes Chromosom hinsichtlich der Randbedingungen $[T_{iB}^{\min}; T_{iB}^{\max}]$ überprüft. Für den Fall der Nichteinhaltung kommt ein neuer Reparaturmechanismus zum Einsatz, der das Chromosom so verändert, dass die Randbedingungen der lokalen verkehrsabhängigen Steuerung eingehalten werden. Sofern die Reparatur nicht funktioniert, wird das Chromosom zufällig neu erzeugt.

Der Reparaturmechanismus ist, wie die Erfinder herausgefunden haben, in seiner Ausführung ein neuer Ansatz und funktioniert wie folgt:

Für jede T-Zeit wird überprüft, ob sie sich innerhalb des Intervalls $[T_{iB}^{\min}; T_{iB}^{\max}]$ befindet. Ist das nicht der Fall, wird der gesamte Signalplan mit Hilfe des lokalen Versatzes θ so verschoben, dass die ungültige T-Zeit der nächsten Grenze des Intervalls $[T_{iB}^{\min}; T_{iB}^{\max}]$ entspricht. Anschließend müssen alle T-Zeiten erneut überprüft werden. Sobald der Signalplan einmal verschoben wurde, darf er nur noch in die gleiche Richtung weiter verschoben werden. Bei einem Widerspruch ist das Chromosom nicht zu reparieren und muss neu erzeugt werden. Der Signalplan darf immer nur komplett verschoben werden, da andernfalls nicht mehr sichergestellt wäre, dass die zwingenden Randbedingungen noch eingehalten sind.

Eine andere praktische Lösung unter Einhaltung problemspezifischer Randbedingungen zur Kodierung der Steuerungsparameter zur Optimierung der Lichtsignalsteuerung stellt eine sequentielle Kodierung dar.

Entwickelt wurde eine sequentielle Kodierung zur Umrechnung eines Individuums in einen Signalplan, der die Randbedingungen der lokalen verkehrabhängigen Steuerung direkt mit berücksichtigt, sodass weder Straffunktionen definiert werden müssen, noch eine so genannte Reparatur (a posteriori Verschieben der Signalpläne in gültige Bereiche) durchgeführt werden muss. Entscheidender Vorteil hierbei ist, dass die Rechenzeit für die Dekodierung des Individuums in Signalpläne auf ein Minimum reduziert wird, was für den Online-Betrieb von entscheidender Bedeutung ist.

Bei der sequentiellen Kodierung ist das Gen θ , also der lokale Versatz nicht notwendig, da die Startzeitpunkte der Phasenübergänge (T-Zeiten) direkt kodiert werden. In den folgenden Formeln wird aus Gründen der Übersichtlichkeit auf den Index B verzichtet (z.B. T_i statt T_{iB}).

Die erste T-Zeit T_1 , die dem lokalen Versatz entspricht, berechnet sich dabei direkt aus dem Gen θ_1 :

$$T_1 = (\tau_1^{\min} + \theta_1 \cdot (\tau_1^{\max} - \tau_1^{\min}))$$

Sie liegt also zwingend im Intervall

$$T_1 \in [\tau_1^{\min}, \tau_1^{\max}]$$

wobei sich die Intervallgrenzen τ_1^{\min} und τ_1^{\max} aus den als bekannt vorausgesetzten Einschränkungen der T-Zeit-Grenzen ergeben.

Für die untere Intervallgrenze τ_1^{\min} gilt:

$$\tau_1^{\min} = \max(T_1^{\min}, T_{1|2}^{\min}, T_{1|3}^{\min}, \dots, T_{1|n}^{\min})$$

mit

$$T_{1|j}^{\min} = T_j^{\min} + \sum_{l=j}^n Z_l \quad \text{für alle } j = 2..n$$

wobei $T_{1|j}^{\min}$ die Bedingung für die untere Intervallgrenze τ_1^{\min} ist, die sich aus der minimalen T-Zeit-Grenzen Bedingung T_j^{\min} ergibt.

Z_l bezeichnet den minimalen Abstand zwischen zwei benachbarten T-Zeiten, also den Mindestabstand zwischen zwei Phasenübergängen und berechnet sich unter der Voraussetzung, dass bei der Planung der Lichtsignalanlage die Zwischenzeiten korrekt eingehalten wurden, zu:

$$Z_l = \max(t_{gr,SG}^{\min} + t_{on,SG} - t_{off,SG})$$

$t_{gr,SG}^{\min}$ bezeichnet die Mindestgrünzeit einer Signalgruppe, $t_{on,SG}$ ist der Einschaltzeitpunkt der Signalgruppe innerhalb des Phasenübergangs zur aktuellen Phase, $t_{off,SG}$ der Ausschaltzeitpunkt der Signalgruppe innerhalb des nächsten Phasenübergangs.

Zu prüfen ist immer die Bedingung:

$$\tau_l^{\min} = \begin{cases} \tau_l^{\min} + t_u & \text{wenn } \tau_l^{\min} < 0 \\ \tau_l^{\min} & \text{sonst} \end{cases}$$

Für die obere Intervallgrenze τ_1^{\max} gilt:

$$\tau_1^{\max} = \min(T_1^{\max}, T_{1|2}^{\max}, T_{1|3}^{\max}, \dots, T_{1|n}^{\max})$$

mit

$$T_{1|j}^{\max} = T_j^{\max} - \sum_{l=1}^{j-1} Z_l \quad \text{für alle } j = 2..n$$

wobei $T_{1|j}^{\max}$ die Bedingung für die obere Intervallgrenze ist, die sich aus der maximalen T-Zeit-Grenzen Bedingung T_j^{\max} ergibt.

Zusätzlich ist zu prüfen:

$$\tau_l^{\max} = \begin{cases} \tau_l^{\max} + t_u & \text{wenn } \tau_l^{\max} < 0 \text{ oder } \tau_l^{\max} < \tau_l^{\min} \\ \tau_l^{\max} & \text{sonst} \end{cases}$$

Alle weiteren T-Zeiten T_i werden sequentiell berechnet. Sie befinden sich jeweils im Intervall

$$T_i \in \left[\max(T_i^{\min}, T_{i-1} + Z_{i-1}), \min\left(T_i^{\max}, T_{i|i+1}^{\max}, T_{i|i+2}^{\max}, \dots, T_{i|n}^{\max}, T_1 + t_U - \sum_{l=i}^n Z_l\right) \right]$$

und werden dann analog wie T_1 über das zugehörige Gen θ_i berechnet.

Fig. 6 verdeutlicht die Einschränkung der Intervallgrenzen für T_i . Für die untere Intervallgrenze τ_i^{\min} ist das Maximum aus T_i^{\min} und der zuvor berechneten T-Zeit T_{i-1} zuzüglich des Mindestabstands Z_{i-1} zwischen T_{i-1} und T_i maßgebend. Für die obere Intervallgrenze τ_i^{\max} ist das Minimum aus T_i^{\max} , aller noch folgenden T-Zeit-Grenzen Bedingungen abzüglich der dazwischen liegenden Mindestabstände, und $T_1 + t_U$ abzüglich aller noch fehlenden Mindestabstände.

Sonderfall:

Bei Anlagen mit nur zwei Phasen und gleichen T-Zeit-Grenzen gilt für die untere Intervallgrenze τ_i^{\min} :

$$\tau_i^{\min} = T_i^{\min}$$

Für die obere Intervallgrenze τ_i^{\max} gilt:

$$\tau_i^{\max} = T_i^{\max}.$$

Es ist wichtig zu beachten:

Bei allen Intervallen und "min/max Betrachtungen" ist zu berücksichtigen, dass es sich bei der Signalsteuerung um einen zyklischen Ablauf handelt, d.h. mit Ablauf der Umlaufzeit beginnt die Zeitskala üblicherweise wieder bei 0. Das Ergebnis des Ausdrucks $\max(T_1; T_2)$ ist deshalb in obigen Formeln der zeitlich später liegende Zeitpunkt und nicht notwendigerweise der höhere skalare Wert. Daher ist zu berücksichtigen, dass vor den Berechnungen sämtliche Intervallgrenzen und T-Zeiten in die richtige (aufsteigende) Reihenfolge gebracht werden.

Die verwendete Kodierung eines Signalplans kann in verschiedenen modellbasierten Steuerungsverfahren, die evolutionäre / genetische Algorithmen zur Optimierung der Steuerungsparameter anwenden, verwendet werden.

Bezugszeichenliste

Bezugsziffern:

- | | |
|----|--|
| 1 | Verkehrsrerchner |
| 1a | erfindungsgemäÙe Bereiche des Verkehrsrerchners |
| 2 | Verkehrsrfluss |
| 3 | Wirkungen |
| 3a | WirkungsgröÙen |
| 4 | Verkehrsrnetz |
| 5 | Zielfunktion |
| 6 | Fitness |
| 7 | neue Signalpläne, z.B. durch aktualisierte Parameter |
| 7' | vorliegende Signalpläne, z.B. durch Projektierung |
| 7a | erzeugte Signalpläne vor Verkehrsrmodell 3 |
| 8 | Optimierung |
| 9 | Anfangsrpopulation |
| 10 | Selektion |
| 11 | Rekombination |
| 12 | Individuum |
| 13 | Mutation |
| 14 | neue Population |
| 15 | Dekodierung |
| 16 | Beziehung wechselnde Nachfrage, Umwelteinflüsse, externe Einflüsse |
| 17 | frühester Start des Phasenüberganges |
| 18 | spätester Start des Phasenüberganges |
| 19 | Puffer für lokale Steuerung |
| 20 | Rahmensignalplan |

Andere Bezugszeichen:

- | | |
|-----------------|---|
| ev. Alg. | Evolutionärer Algorithmus |
| gen. Alg. | Genetischer Algorithmus |
| LSA | Lichtsignalanlage |
| DE | Detektor |
| DA | Verkehrsrdaten, Detektormesswerte |
| PA | Parameter |
| PA _n | Parameter neu bzw. aktualisiert |
| PA _v | Parameter vorliegend (z. B. aus Anlagenprojektierung) |
| S | Steuerung der LSA (arbeitend z.B. mit neuem Signalplan 7 bzw. mit PA _n) |
| VE | Verkehrsrgeschehen, reale Welt |

Patentansprüche

1. Verkehrssteuerung zur Beeinflussung eines Verkehrsflusses (2) innerhalb eines beschränkten Straßen- bzw. Verkehrsnetzes (4) mit Kreuzungen, z. B. von einer Großstadt, mit einer der Kreuzungs- Anzahl N entsprechenden Anzahl von Lichtsignalanlagen (LSA) mit individuellen Steuerungen (S), deren den Steuerungsablauf aktuell bestimmende Signalpläne (7') an einen Verkehrsrechner (1) weiterleitbar sind, wobei Detektoren (DE) im Zusammenhang mit den Lichtsignalanlagen (LSA) vorgesehen sind, durch die Verkehrsdaten (DA) erfassbar und an den Verkehrsrechner (1) weiterleitbar sind, wobei der Verkehrsrechner (1) durch Implantierung von evolutionären Algorithmen (ev. Alg.) mit einem zugeordneten Abbruchkriterium (Abbruch) so operieren kann, dass der Verkehrsrechner (1) an alle N Lichtsignalanlagen (LSA) aufgrund des über die erfassten Verkehrsdaten (DA) ermittelten Verkehrsflusses (2) des Straßennetzes aktualisierte Signalpläne (7) innerhalb eines geeigneten Zeitrahmens an alle N Lichtsignalanlagen (LSA) zur Optimierung des Verkehrsflusses (2) zuzuführen vermag, wobei zur Erreichung des geeigneten Zeitrahmens, innerhalb dessen die Phasenübergänge, die Bestandteil eines Signalplanes sind, stattfinden dürfen, ein Reparaturmechanismus bei relativer Kodierung oder eine sequentielle Kodierung zum Einsatz gelangen.
2. Verkehrssteuerung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass der Verkehrsrechner (1) einen Bereich (1a) mit Unterbereichen aufweist, der die Evolutionären Algorithmen (ev. Alg.) bzw. genetischer Algorithmus (gen. Alg.), ein Abbruchkriterium (Abbruch) und bei relativer Kodierung den Reparaturmechanismus oder die sequentielle Kodierung verkörpert.
3. Verkehrssteuerung nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, dass der Bereich (1a) durch einen separaten Rechner gebildet wird, der in Datenaustausch mit dem Rechner (1) steht.
4. Verkehrssteuerung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass als geeigneter Zeitrahmen für die Optimierung des Verkehrsflusses (2) ein Bereich von fünf bis zehn Minuten erreichbar ist.
5. Verfahren zum Betrieb einer Verkehrssteuerung, insbesondere nach einem der vorhergehenden Ansprüche, mit den Schritten zur Optimierung:
 - Bewerten des Verkehrsflusses (2) mit einem Verkehrsmodell (3) innerhalb des Rechners (1),

- Eingeben der Daten (DA) von Detektoren (DE) von Kreuzungen des Verkehrsnetzes (4),
 - Anwendung evolutionärer Algorithmen,
 - Eingeben der Signalpläne (7') der Lichtsignalanlagen (LSA),
 - Bilden einer Wirkungsgröße (3a) mittels des Verkehrsmodells (3),
 - Bewerten der Wirkungsgröße (3a) mit einer Zielfunktion (5) zur Gewinnung einer Fitness (6),
 - Ausgeben neuer Signalpläne (7) bei Vorliegen eines geeigneten Fitnesswerts an die Lichtsignalanlagen (LSA) des Verkehrsnetzes (4),
 - bei Nichtvorliegen eines geeigneten Fitnesswertes Durchlauf zur Optimierung (8) von einer Verarbeitungsschleife mit Selektion (10), Rekombination (11), Mutation (13), Neuer Population (14), und Dekodierung (15),
 - zusätzliche Zuführung einer Anfangpopulation (9),
 - Bildung eines Individuums (12) mit Genen als Steuerungsparameter im Bereich (9, 10, 11, 13 – 15) entsprechend evolutionärer Algorithmen,
 - Rückübersetzung mit der Dekodierung (15) in einen Signalplan (7a),
 - Durchlaufen der Schleife Optimierung (8) solange, bis durch ein Abbruchkriterium (Abbruch) ein neuer Signalplan (7) an die Lichtsignalanlagen (LSA) ausgegeben werden kann,
 - Vorsehen einer eingrenzbaeren Anzahl von Schleifendurchläufen zur Einhaltung eines geeigneten Zeitrahmens zur Ausgabe aller Signalpläne (7) an alle Lichtsignalanlagen (LSA), und
 - Bereitstellen eines Reparaturmechanismus bei relativer Kodierung oder Bereitstellen einer sequentiellen Kodierung.
6. Verfahren zum Betrieb einer Verkehrssteuerung nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, dass Individuen, aus der neuen Population (14) in Signalpläne (7a) dekodiert werden, die dem weiteren Schleifendurchlauf unterliegen.
7. Verfahren zum Betrieb einer Verkehrssteuerung nach Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, dass in Abhängigkeit von der Rechenleistung des Rechners eine erhebliche Anzahl von Individuen, die Signalpläne (7a) repräsentieren, erzeugt werden.
8. Verfahren zum Betrieb einer Verkehrssteuerung nach Anspruch 5 bis 7, dadurch gekennzeichnet, dass bei dem Reparaturmechanismus bei relativer Kodierung T-Zeiten für jedes Chromosom definiert sind, dass jede T-Zeit überprüft wird, ob sie sich innerhalb des Intervalls $[T_{iB}^{\min}; T_{iB}^{\max}]$ befindet und falls dies nicht der Fall ist,

der gesamte Signalplan mit Hilfe des lokalen Versatzes θ so verschoben wird, so dass die ungültige T-Zeit der nächsten Grenze des Intervalls $[T_{iB}^{\min}; T_{iB}^{\max}]$ entspricht, wobei anschließend alle T-Zeiten erneut überprüft werden müssen.

9. Verfahren zum Betrieb einer Verkehrssteuerung nach Anspruch 5 bis 7, dass bei der sequentiellen Kodierung T-Zeiten T_i sequentiell berechnet werden, wobei die erste T-Zeit T_1 , die dem lokalen Versatz entspricht, sich dabei direkt aus dem Gen θ_1 berechnet:

$T_1 = (\tau_1^{\min} + \theta_1 \cdot (\tau_1^{\max} - \tau_1^{\min}))$ und ferner für alle Zeiten T_i vorgesehen ist, dass sie sich jeweils im Intervall

$$T_i \in \left[\max(T_i^{\min}, T_{i-1} + Z_{i-1}), \min\left(T_i^{\max}, T_{i+1}^{\max}, T_{i+2}^{\max}, \dots, T_{in}^{\max}, T_1 + t_U - \sum_{l=i}^n Z_l\right) \right] \text{ befinden}$$

und analog wie T_1 über das zugehörige Gen θ_i berechnet werden.

10. Computerprogrammprodukt, das direkt in einen Speicherbereich (1a), mindestens Unterbereich von (1a) des Verkehrsrechners (1) oder eines separaten Rechners, wie insbesondere in Anspruch 3 angegeben, ladbar ist, mit Programmcode-Mitteln, die dazu bestimmt sind, einzelne oder alle Schritte des vorstehend beschriebenen Verfahrens gemäß den Ansprüchen 5 bis 9 auszuführen, wenn das Computerprogrammprodukt auf dem entsprechenden Rechner der Verkehrssteuerung ausgeführt wird.

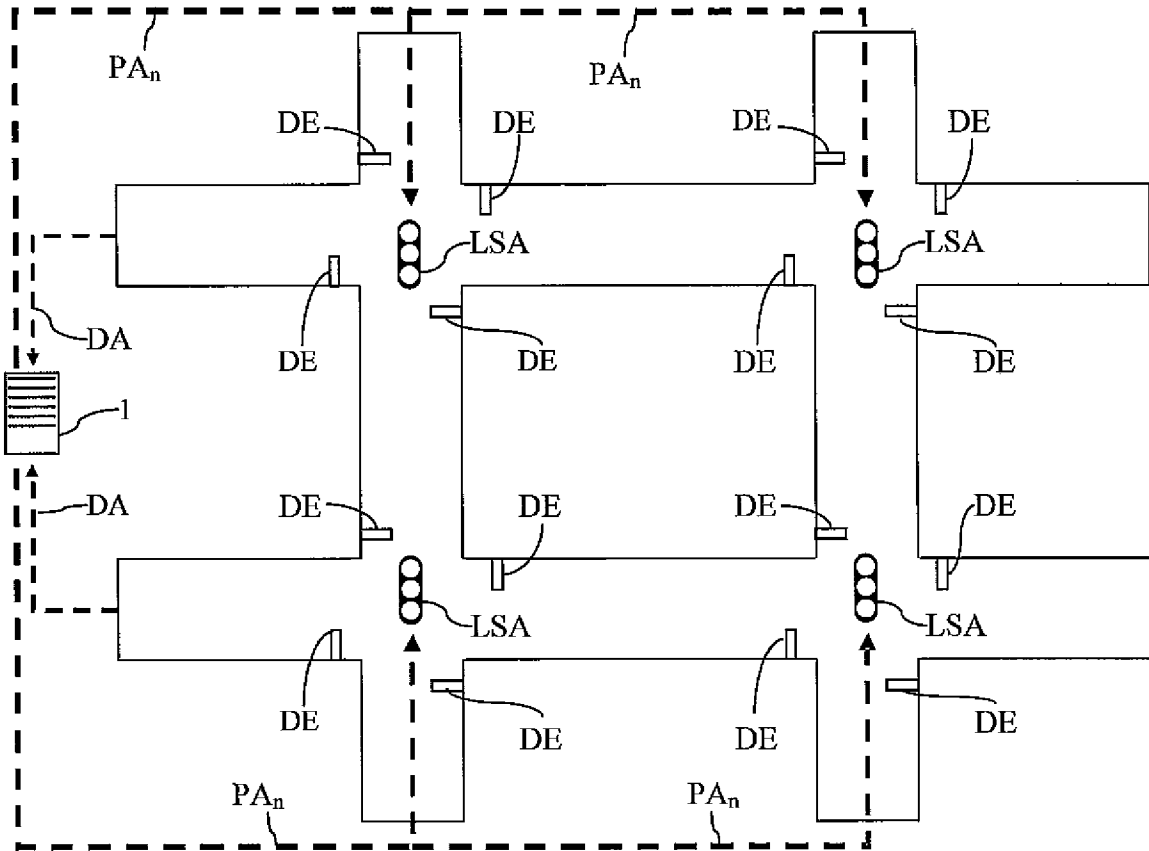


Fig. 1

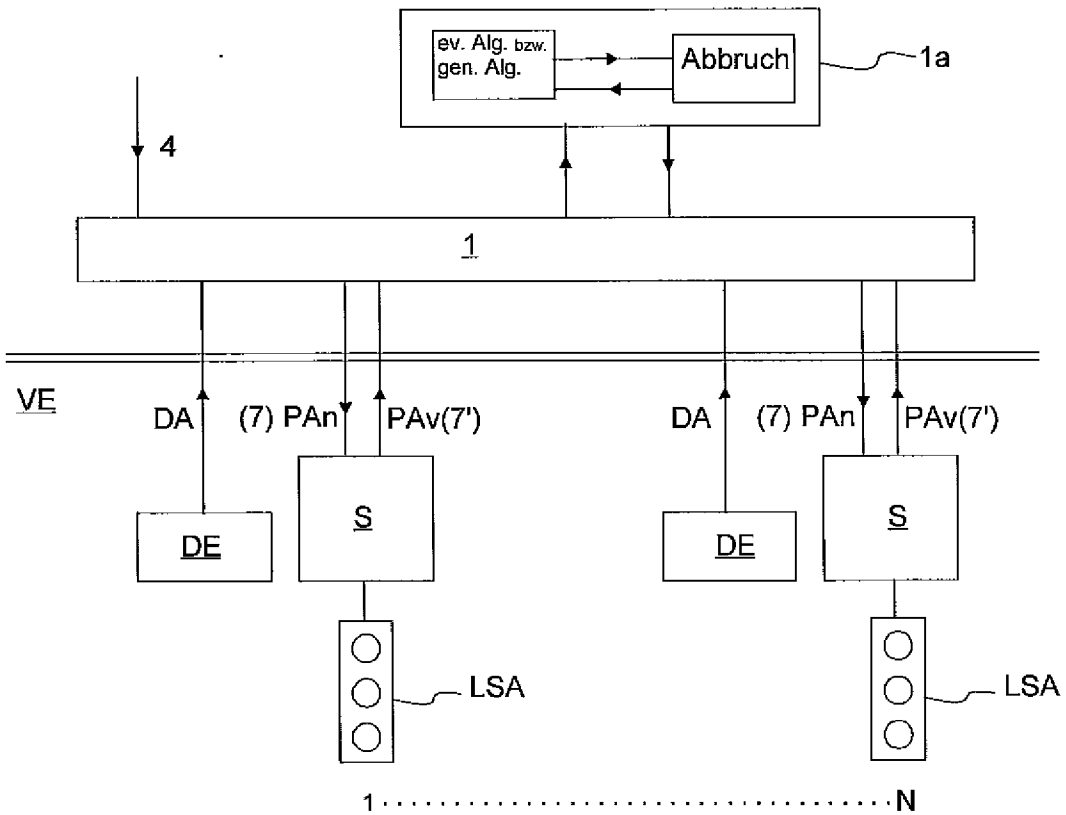


Fig. 2

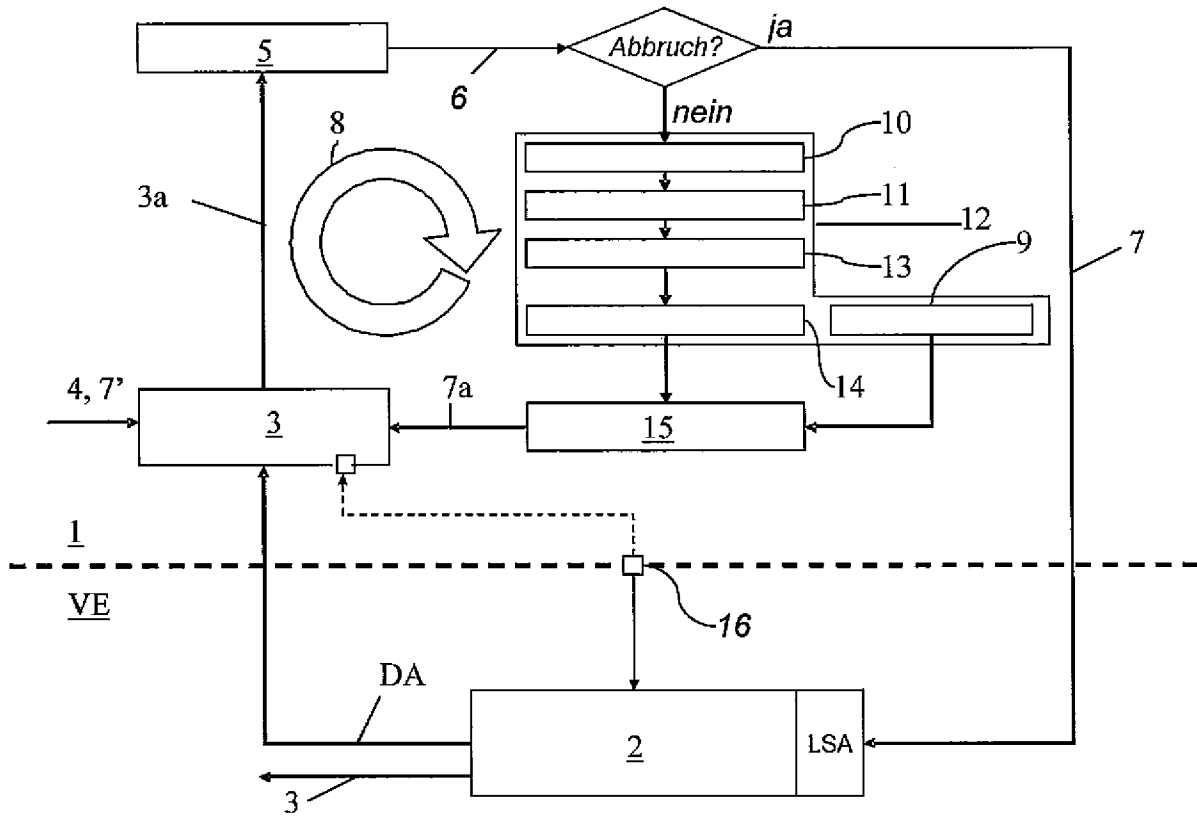


Fig. 3

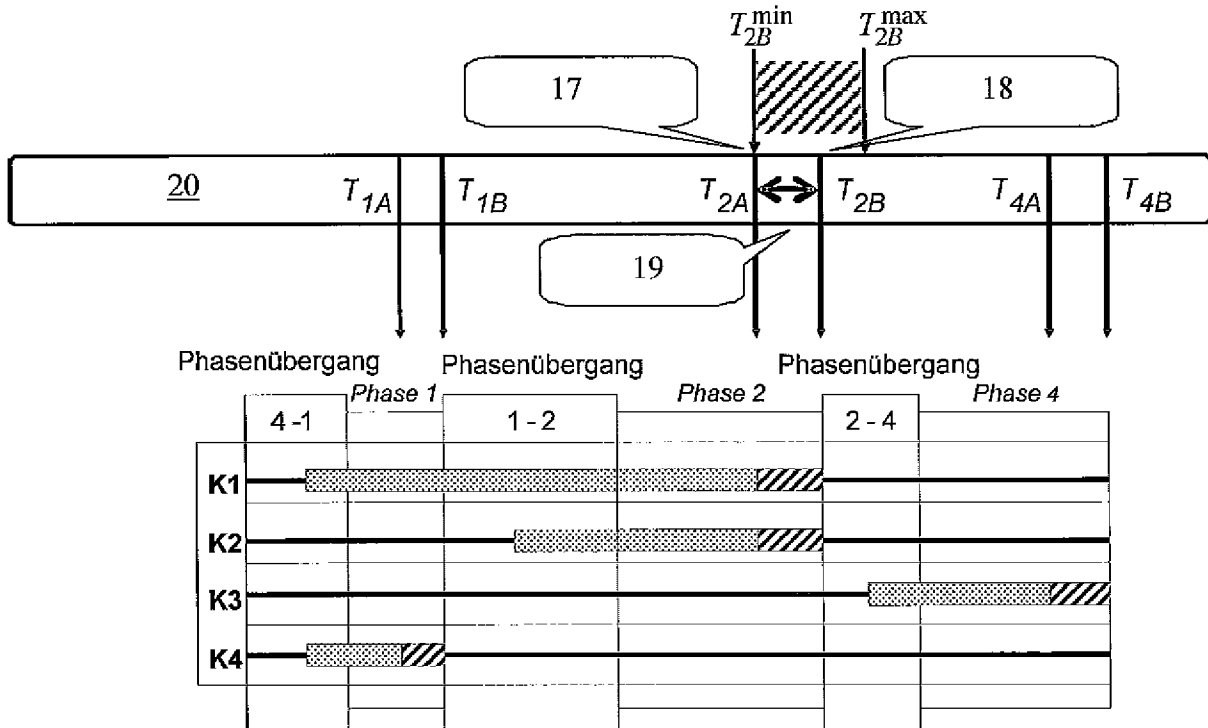


Fig. 4

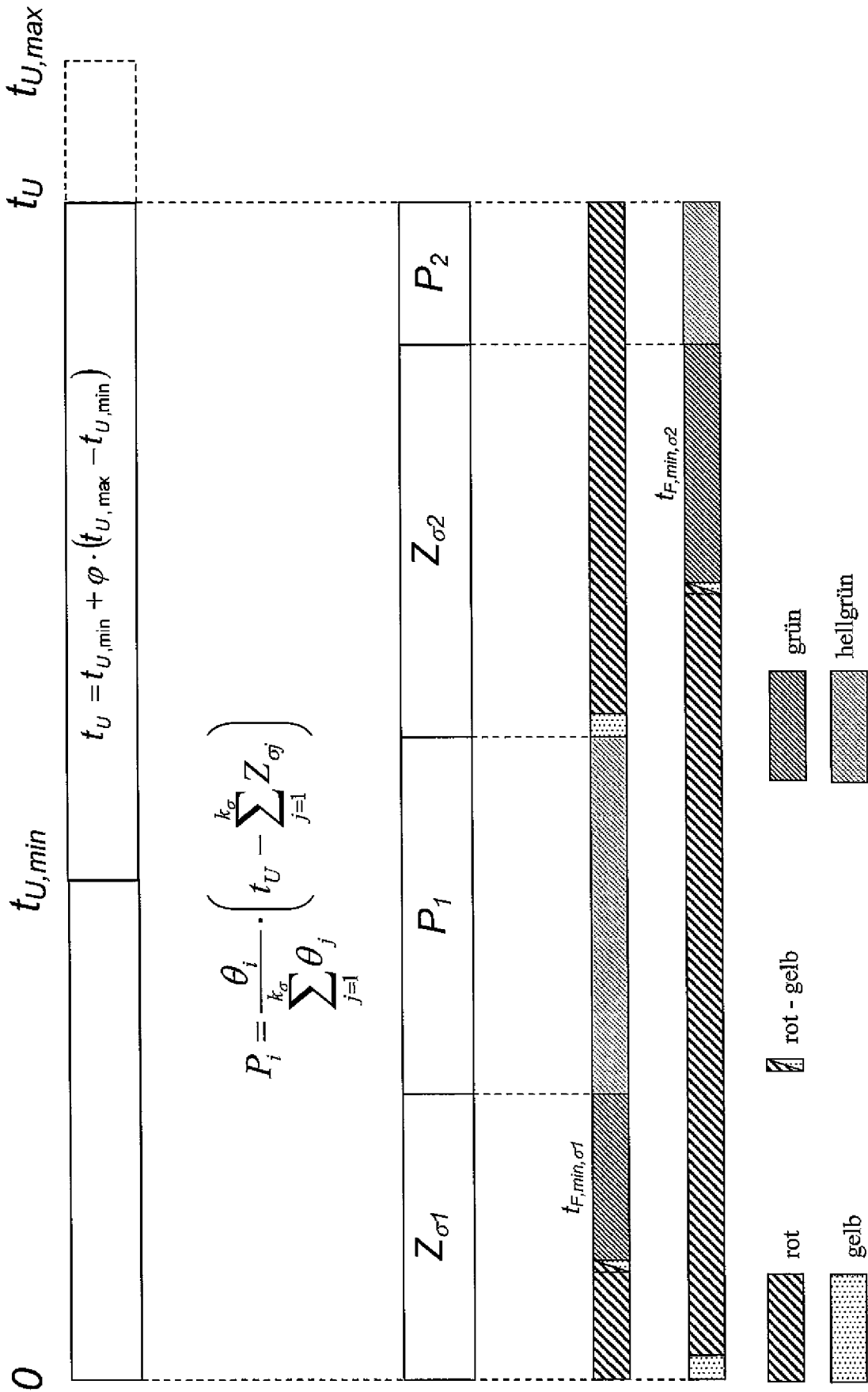


Fig. 5

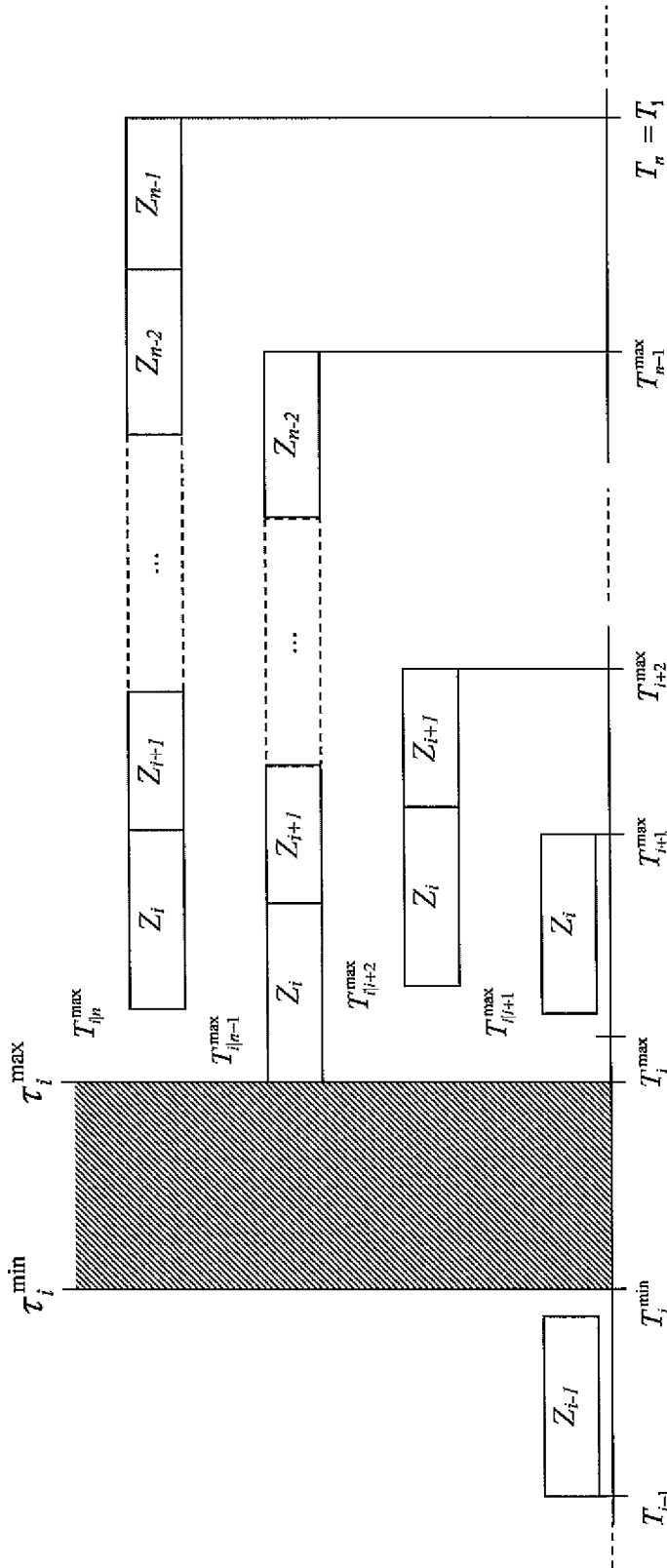


Fig. 6